

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

UTILIZAÇÃO DA PIRÓLISE COMO TRATAMENTO DOS RESÍDUOS TÊXTEIS DE FIBRAS NATURAL E ARTIFICIAL RESULTANTE DO CORTE NA INDÚSTRIA DE CONFECÇÃO

Gislaine Cristina Sales Brugnoli da Cunha¹
Franciele Saraiva Fonseca¹
Jussara Aparecida Teixeira²
* Luciana Rezende Alves de Oliveira¹

USE OF PYROLYSIS AS TREATMENT OF NATURAL AND ARTIFICIAL FIBER TEXTILE WASTE RESULTING FROM CUTTING IN THE CLOTHING INDUSTRY

Recibido el 17 de mayo de 2021. Aceptado el 27 de octubre de 2021

Abstract

Textile manufacturing is one of the oldest technologies used by man. Brazil is one of the largest world producers in the textile sector, and is still an important producer of cotton fiber, producing an average of 9 billion pieces per year. An alternative to avoid inappropriate destination is recycling. Thus, this research investigated the technological feasibility for the conversion of textile waste, composed of cotton, viscose and linen fibers through the pyrolytic process. The pyrolysis was carried out in a cylindrical reactor without gas flow, at temperatures of 500 and 700°C and times of 30 and 60 minutes. The results revealed that, among the 137 types of textile composition distributed in 801 types of fabrics with different weight, color or weave, fabrics A (100% Cotton) and VLA (65% Viscose, 21% Linen, 14% Cotton) were those chosen for this research. The results of the generated biomass and by-products, revealed characteristics for use in the chemical and energy industry, since the higher calorific value was 2.214 Kcal/Kg, due to the low moisture and ash content, high volatile material content, low density and high content of C and H found in textile residues A (47.64%) and VLA (44.91%). The solid textile material was compared to bituminous coal in C, N and H levels and TOC content. Therefore, it is possible to conclude that the textile residues A and VLA presented favorable physicochemical characteristics not only for energy production, but also for use in other industrial sectors.

Keywords: artificial fiber, natural fiber, textile waste, fixed bed reactor, pyrolysis.

¹ Laboratório de Resíduos Químicos, Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), Brasil.

² Instituto Federal do Sul de Minas (IFSul), Brasil.

* *Autor correspondente:* Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP). Av. Costábil Romano, 2201 – Bairro: Ribeirânia, Ribeirão Preto – São Paulo, CEP: 14096-900. Brasil. Email: rloliveira@unaerp.br

Resumo

A fabricação têxtil é uma das mais antigas tecnologias utilizadas pelo homem. O Brasil configura como um dos maiores produtores mundiais do setor têxtil, sendo ainda um importante produtor de fibra de algodão, produzindo em média 9 bilhões de peças por ano. Uma alternativa para evitar a destinação inadequada é a reciclagem. Assim, esta pesquisa investigou a viabilidade tecnológica para a conversão de resíduos têxteis, compostos por fibras de algodão, viscose e linho através do processo pirólítico. A pirólise foi conduzida em reator cilíndrico sem fluxo de gás, nas temperaturas de 500 e 700°C e tempos de 30 e 60 minutos. Os resultados revelaram que, dentre os 137 tipos de composição têxtil distribuídas em 801 tipos de tecidos com gramatura, cor ou trama diferentes, os tecidos A (100%Algodão) e VLA (65%Viscose, 21%Linho, 14%Algodão) foram os escolhidos para esta pesquisa. Os resultados da biomassa e dos subprodutos gerados, revelaram características para utilização na indústria química e de energia, pois o poder calorífico superior foi de 2.214 Kcal/Kg, em função do baixo teor de umidade e cinzas, alto teor de material volátil, baixa densidade e alto teor de C e H encontrados nos resíduos têxteis A (47.64%) e VLA (44.91%). O material têxtil sólido foi comparado ao carvão betuminoso nos teores de C, N e H e teor de TOC. Portanto, é possível concluir que os resíduos têxteis A e VLA apresentaram características físico-químicas favoráveis não só a produção de energia, mas também para uso em outros setores industriais.

Palavras chave: fibra artificial, fibra natural, resíduo têxtil, reator de leito fixo, pirólise.

Introdução

A fabricação têxtil é uma das mais antigas tecnologias utilizadas pelo homem, e os tecidos conhecidos mais antigos datam, de aproximadamente, o ano de 5000 a.C. Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o Brasil configura como um dos maiores produtores mundiais do setor têxtil e do vestuário, sendo ainda um importante produtor de fibra de algodão, produzindo em média 9 bilhões de peças por ano e o segundo maior empregador da indústria de transformação.

No século XVIII, na Europa, antes do aparecimento do algodão, as fibras utilizadas eram a lã, o linho e a seda. No entanto, no fim do mesmo século os ingleses conseguiram fabricar um tecido a que deram o nome de “JULINE”, tecido composto de fios de algodão e linho, alcançando sucesso absoluto, que sua fabricação foi insuficiente para o consumo, obrigando as indústrias importarem grande quantidade de fio produzido em outros países.

Os impactos decorrentes da produção do algodão percorrem toda a cadeia produtiva têxtil, desde o plantio até a confecção da peça, além dos impactos derivados da comercialização. Os retalhos gerados na confecção causam um impacto altamente significativo e não perceptível, sendo coletados de forma desorganizada e sem preocupação com a destinação final adequada.

Mundialmente 10% dos resíduos descartados são extraviados durante o processo fabril de confecção, o que corresponde a aproximadamente 9.6 milhões de toneladas por ano, enquanto menos de 1% das fibras têxteis usadas na produção de roupas são recicladas e destinadas para a

produção de novas peças, o equivalente a um caminhão de roupas é enviado ao aterro ou à incineração a cada segundo (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

A indústria da moda é a segunda maior poluidora do mundo, ficando atrás apenas da indústria de petróleo e gás. O Brasil é considerado a quinta maior indústria têxtil do mundo gerando cerca de 170.000 toneladas de retalhos têxteis por ano, e o quarto maior produtor de denim e de malhas, tendo produzido cerca de 8.9 milhões de peças em 2018, sendo que desse montante 5.1 bilhões correspondem apenas a peças de vestuário, movimentando no país cerca de 50 bilhões de faturamento (ABIT, 2018).

A estimativa de crescimento em território nacional para 2021 é de 13% no mercado de moda, o que pode elevar a produção em 6.68 bilhões de peças, considerando esses dados antes da pandemia da Covid-19. Todo esse potencial da indústria têxtil resulta na geração de aproximadamente 160.000 toneladas de resíduos por ano no país, dos quais estima-se que 50% desse total irá para reciclagem (FIESP, 2019).

O Brasil conquistou importância e legitimidade no cenário mundial na área de produção de fibras, fios e tecidos, pode parecer algo positivo para o cenário econômico, porém, gera graves problemas ambientais. Etapas como a produção de resíduos nos processos industriais, especificamente na fabricação de fios, ocasiona muitas sobras e desperdício de tecidos e o descarte incorreto no pós-consumo (Zonatti, 2016).

No Brasil em 2018, a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) foi de 79 milhões de toneladas, o que representa um aumento de pouco menos de 1% em comparação ao ano de 2017. Desse montante, 92% (72.7 milhões) foi coletado, mas por outro lado, fica evidente que 6.3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração (ABRELPE, 2018/2019).

Do montante de resíduos sólidos urbanos coletados, apenas 59.5% tiveram a destinação adequada, o que representa 43.3 milhões de toneladas, o restante 40.5% foi descartado em locais inadequados, ou seja 29.4 milhões de toneladas de RSU foram para lixões ou aterros controlados, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessárias para a proteção da saúde humana e do meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2018/2019).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei 12.305/2010 em seu artigo 9º, define o gerenciamento de resíduos sólidos estabelecendo uma ordem de prioridade a ser observada: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Podendo ser utilizadas tecnologias visando a recuperação energética dos resíduos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua

viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (Brasil, 2010).

Assim, um dos sistemas de reciclagem que oferece uma alternativa para os resíduos têxteis é o processo de pirólise, que consiste na decomposição térmica de uma substância, que na ausência de oxigênio, quando aquecida gera vapores, e ao ser resfriada produz um líquido conhecido como bio-óleo.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo investigar a viabilidade tecnológica para a conversão de resíduos têxteis, compostos por fibras de algodão, viscose e linho visando a obtenção de carvão, gás e bio-óleo em reator de leito fixo sem fluxo de gás.

Metodologia

Escolha da amostra têxtil

A escolha da amostra têxtil foi realizada através da análise de gravimetria realizada por Teixeira (2019), e esta escolha deveria estar delimitada com o tipo de trama dos resíduos, com o objetivo de viabilizar o processo de trituração e a composição com menor valor de comercialização para fins de reciclagem mecânica, e cuja cinética de reação térmica apresentou condições para a realização da pirólise. Sendo assim, numa primeira etapa os tecidos planos com composição de algodão, viscose e linho foram inicialmente separados, e numa segunda etapa verificou a maior geração do tipo obtido no processo gravimétrico, possibilitando a quantidade suficiente para o desenvolvimento dos testes pirolíticos.

Padronização e secagem das amostras têxteis

A primeira etapa do processo pirolítico refere-se à homogeneização da amostra de resíduo têxtil, evitando assim a dissipação de calor irregular durante os experimentos. Para isso, os resíduos têxteis de tecido plano foram fatiados no sentido diagonal da trama com máquina de costura overlock Marca Sun Especial Modelo CG 6170 na largura de 5 mm e comprimento variados entre 30 mm e 70 mm.

Em seguida, os resíduos fatiados foram triturados em um liquidificador por 15 segundos com intensa rotação e intervalos de aproximadamente um minuto para resfriamento da faca do liquidificador, até a amostra adquirir forma de composto fibroso homogêneo com espessura de ~1 mm e comprimento \geq 40 mm.

Para secagem da amostra, o composto fibroso de resíduo têxtil foi acomodado em um béquer com capacidade para 50 mL e inserido na estufa, à temperatura de 100°C por 60 minutos. Em seguida o béquer foi colocado no dessecador para resfriar por 30 minutos. A secagem da amostra ocorreu em ciclos até a atingir massa constante.

Sistema utilizado no processo de pirólise

Os experimentos de pirólise com os resíduos têxteis A (100% Algodão) e VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão) foram conduzidos em escala de bancada nas temperaturas de 500°C e 700°C no tempo de 30 minutos e 60 minutos. Foi utilizado um reator de leito fixo, sem fluxo de gás inerte, com sistema para coleta de gás e líquido acoplado, conforme desenho técnico da Figura 1.

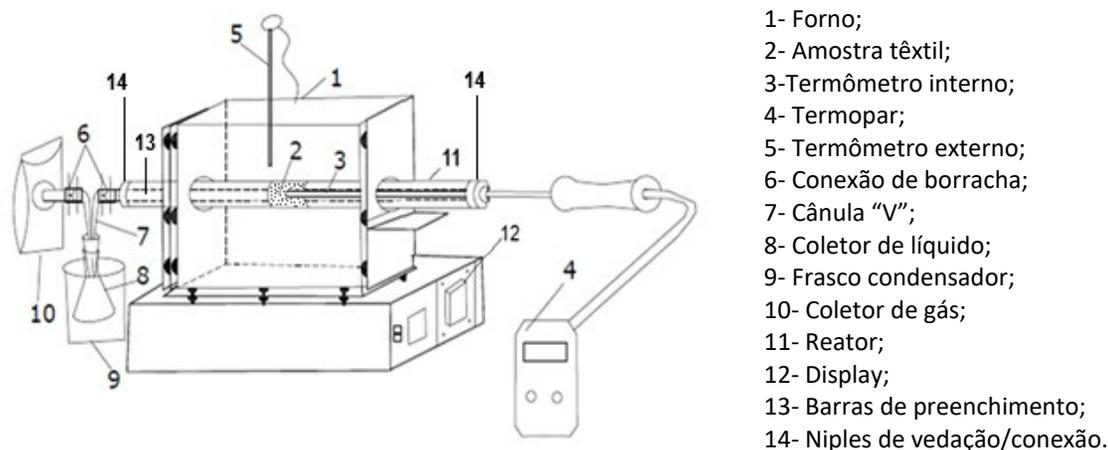


Figura 1. Desenho esquemático do reator pirolítico.

O aquecimento do reator foi realizado utilizando-se um forno elétrico de acomodação tubular, com potência de 600 W, sem mecanismos para controle da taxa de aquecimento. Foi utilizado barras em aço inox para reduzir a presença de oxigênio. A amostra de 10 g de resíduo têxtil foi compactada no centro do reator, assim como foi posicionada a haste do sensor de temperatura. O reator foi vedado com niples, que simultaneamente serviam de conexão entre o sensor de temperatura, o sistema de coleta de gás e líquido e o reator. O peso do reator foi registrado vazio, com a amostra e após o processo de pirólise, para fins de balanço de massa. Assim, como o peso do sistema de coleta de gás e líquido foi registrado vazio e pós pirólise. Os valores da temperatura registrados no termopar, foram anotados a cada 30 segundos ao longo do tempo pré-determinado. Os dados coletados foram usados para calcular a rampa de aquecimento conforme metodologia sugerida por Nicolini (2013).

Ao final do experimento, a fração líquida, sólida e gasosa foi retirada do sistema pirolítico. Os rendimentos gravimétricos dos subprodutos gerados no processo de pirólise foram quantificados por meio do balanço de massas, conforme as orientações da NBR 8112 (ABNT 1986), descritas por Nicolini (2013). As análises foram realizadas em triplicata para cada amostra, para validação dos resultados.

Análises físico-químicas das amostras têxteis

Os compostos foram analisados de modo físico-químico para identificar o potencial de reciclabilidade. A densidade aparente foi definida segundo a metodologia de Figueiredo (2011).

Na análise imediata o teor de umidade foi conduzido segundo a ASTM-D3173-85; o teor de cinzas e material volátil foi determinado pelo método ASTM-D 2415-66 e o teor de carbono fixo foi determinado de modo indireto conforme a ABNT/NBR 8299.

A análise de poder calorífico superior e inferior foi determinada por meio de bomba calorimétrica modelo FTech- ISO5660 orientada pela normativa ASTM 407-44.

As análises termogravimétricas foram realizadas no equipamento Thermo Gravimetric Analyser (TGA) Q500, marca TA Instruments. Foram utilizados 2 mg de resíduos têxteis em um cadinho de platina submetidos a taxa de aquecimento de 70°C/ min com temperatura máxima de 950°C em atmosfera inerte de N₂ a 60 ml/min.

As análises elementares utilizadas para determinar as porcentagens de carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H), oxigênio (O) e enxofre (S) nas amostras de resíduo têxtil e no carvão gerado no processo pirolítico foram conduzidas conforme a metodologia de ASTM 5373/2002 através do Analisador Elementar Perkin Elmer 2400 series ii.

Para analisar a morfologia das fibras têxteis e dos carvões derivados do processo de pirólise em tempos e temperaturas variados, as análises foram submetidas a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Por se tratar de material de baixa condutividade, as amostras foram preparadas e submetidas ao processo de evaporação (carbono) e ao processo de metalização (ouro) no metalizador Bal-Tec SCD 050 e colocadas no Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss Evo 50.

As amostras foram registradas na amplitude de 500, 1000 e 5000 vezes com 20,000 W de potência. Durante as análises foi observado que o feixe de luz emitido nas amplitudes maiores que 5000X provocavam deterioração da fibra, impedindo seu registro. Por isso, foi determinado o limite máximo de 5000X para ampliação em todas as amostras.

A determinação de carbono orgânico total (TOC) no subproduto sólido foi realizada no cromatógrafo Shimadzu, modelo TOC-L-SSM-5000 A, através do método de oxidação por combustão catalítica na temperatura de 900°C. O carbono presente na amostra foi oxidado e convertido a óxido de carbono (CO₂) e detectado no detector de infravermelho não dispersivo.

Resultado e discussão

A delimitação da amostra considerou o tipo de trama com o objetivo de viabilizar o processo de trituração; a composição com menor valor de comercialização para fins de reciclagem mecânica e a viabilidade técnica para realização da pirólise.

Considerou-se também a origem das fibras, uma vez que as fibras da composição escolhida, são de origem natural (algodão e linho) e foram menos utilizadas (1.4%), seguido dos tecidos de fibra artificial (viscose) (7.4%) e fibra sintética (29.1%), enquanto que, os tecidos de fibras mistas obtiveram o volume de (62.1%) conforme Tabela 1.

Tabela 1. Frequência de tecidos utilizados segundo a origem da fibra em uma indústria têxtil de Minas Gerais

Origem da fibra	Frequência	%
<i>Fibras Puras</i>		
Naturais	11	1.4
Artificial	59	7.4
Sintética	233	29.1
<i>Mistura de fibras</i>		
Sintéticas	335	41.8
Natural	2	0.2
Artificial + sintética	65	8.1
Artificial + natural	41	5.1
Natural + sintética	27	3.4
Natural + artificial + sintética	28	3.5
Total	801	100

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a reciclagem térmica deve ser usada quando os resíduos gerados não apresentam grau de reciclabilidade (Brasil, 2010). Neste cenário, o termo reciclabilidade envolve além das características propícias a transformação do resíduo, a sustentabilidade nos seus pilares sociais, ambientais e econômicos.

Desta forma, o resíduo têxtil é considerado um resíduo reciclável, porém as tecnologias de tratamento disponíveis estão voltadas para a reciclagem de fibras puras e mistas separadamente, uma vez que as fibras puras (em menor quantidade) tem maior valor de mercado, e por isso, tornam-se mais viáveis ao gerenciamento. Diferente das fibras mistas, que correspondem a maior parte dos resíduos têxteis, cujo valor de mercado é baixo (Amaral, 2016).

Assim, dentre os 137 tipos de composição têxtil distribuídas em 801 tipos de tecidos com gramatura, cor, estampa ou trama diferentes (Teixeira, 2019), os tecidos A (100% Algodão) e VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão) foram os escolhidos para o desenvolvimento desta pesquisa, propiciando o resultado esperado para o processo de pirólise.

Quantificação e Caracterização dos Subprodutos Gerados no Processo Pirolítico

As caracterizações das amostras de resíduos têxteis apresentadas na Tabela 2, revelaram por meio da densidade aparente, análise imediata, poder calorífico e análise elementar grande quantidade de energia por unidade de massa em um processo de combustão (Sousa, 2009), devido ao alto teor de material volátil em torno de 83% para o resíduo A e 86% para o resíduo VLA, assemelhando assim aos combustíveis fósseis, cujo os valores estão entre 75% e 90% (Rago, Surroop, Mohee, 2018). Parte deste resultado está atrelado a densidade abaixo de 0.1%, que favoreceu a temperatura de ignição através da circulação de oxigênio por entre os poros (Figueiredo, 2011) e ao teor de cinzas que se mantiveram abaixo de 6%. Acima deste limite, as cinzas comprometem o sistema de combustão afetam a transferência de calor, reduzem o poder calorífico, provocam incrustações, corrosão e erosão devido à presença de metais pesados tóxicos, sais solúveis e outros compostos (Rago, Surroop, Mohee, 2018).

Tabela 2. Análises imediata, elementar, densidade aparente e poder calorífico dos resíduos têxteis.

Análises	Descrição	Resíduo A (100% Algodão)	Resíduo VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão)
Densidade Aparente	Densidade (média)	0.2363	0.2365
	Umidade (%)	7.22	9.42
Análise imediata	Cinza (%)	1.22	0.94
	Material Volátil (%)	83.31	86.97
	Carbono Fixo (%)	8.25	2.67
Poder Calorífico	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	1.803	2.214
	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	1.685	2.050
Análise Elementar	Carbono (%)	83.09	85.87
	Hidrogênio (%)	1.44	1.09
	Nitrogênio (%)	0.65	0.28
	Oxigênio + Enxofre (%) ¹	14.82	12.76

O teor de umidade, apesar de absorver energia durante o processo de evaporação e reduzir o poder calorífico do material, também atua junto ao hidrogênio na produção de calor latente (Sousa, 2009).

Neste sentido, apesar do hidrogênio do resíduo têxtil VLA ser menor em relação ao resíduo têxtil A, o teor de umidade do resíduo têxtil VLA foi maior, conferindo assim maior capacidade energética.

Contudo, o poder calorífico superior de ambas amostras se manteve em torno de 2.214 Kcal/kg, resultados encontrados que assemelham ao potencial energético comumente empregadas no mercado da biomassa do lodo têxtil (2.100 kcal/kg), do bagaço de cana (2.130 kcal/kg) ou cavaco de pinus (2.500 kcal/kg) (Fischer, 2015).

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos Resíduos Têxteis

Ao comparar a morfologia estrutural entre os resíduos A e VLA (Figura 2a e 2b) foi possível perceber que a fibra de viscose é mais espessa, porosa e menos cristalina e, portanto, com mais capacidade de adsorção se comparada a fibra de algodão.

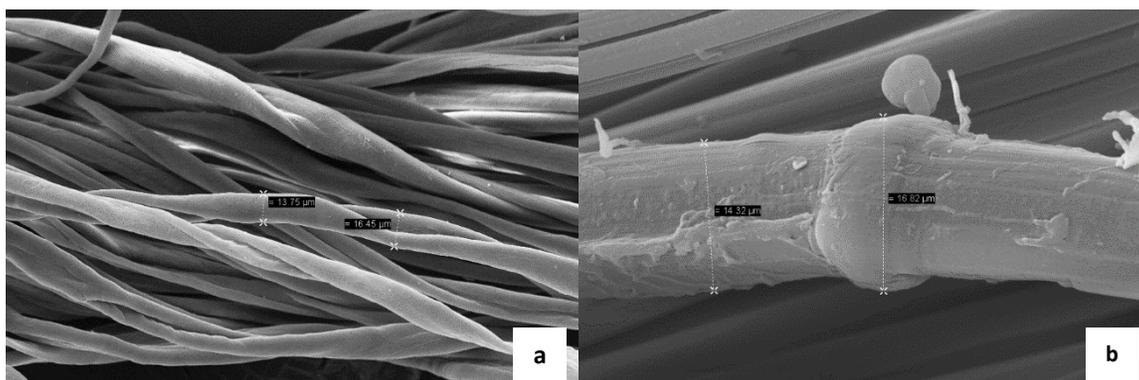


Figura 2. Morfologia do resíduo têxtil: a) resíduo A (100% Algodão) - 20kv-1μm -1000X; b) resíduo VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão) a 20kv-2μm -5000X.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Carvão Gerado no Processo de Pirólise

Analisando as funções de tempo e temperatura utilizada nos experimentos, foi possível verificar que a proporção de sólidos resultante do processo de pirólise oscilou entre 20.4% a 25.1% referente aos resíduos oriundos do algodão, e de 19.9% a 26.3% referente aos resíduos oriundos da mistura têxtil viscose/linho/algodão.

A aparência morfológica dos carvões resultantes do resíduo A (Figura 3a), apresentou regiões amorfas e cristalinas similares a biomassa com características lineares, entretanto, a redução no diâmetro, as rupturas no comprimento das fibras decorrentes da ação termoquímica, a formação ondulada na parede externa do sólido gerado e a ausência de fissuras, mostram indícios de alta porosidade (Plens, 2018).

A análise morfológica dos carvões resultantes do resíduo VLA (Figura 3b), revelou aparência irregulares com relação a forma, tamanho e diâmetro, pois, as fibras de algodão foram solidificadas junto às fibras de viscose e linho formando blocos de carvão. As medidas registradas na análise morfológica se mostraram variadas com diminuição de espessura quando comparado ao carvão proveniente da fibra A.

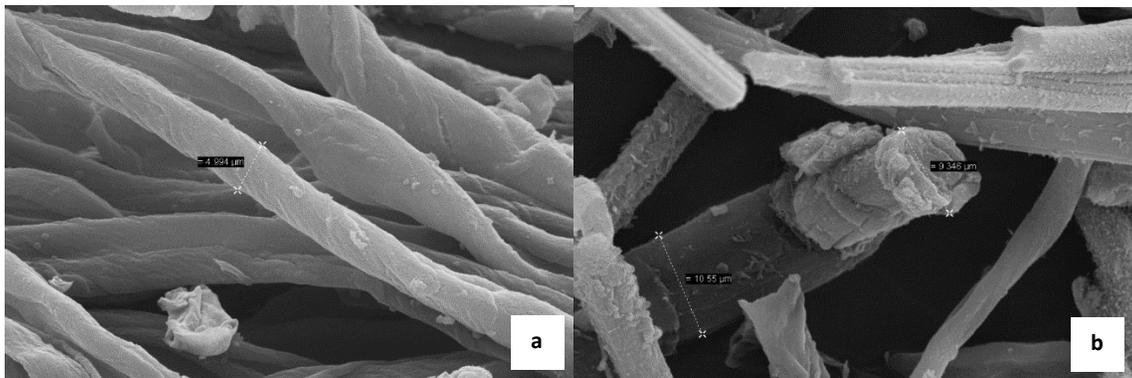


Figura 3. Morfologia do carvão: a) carvão resíduo têxtil A (100% Algodão) temperatura de 500°C e tempo de retenção de 30 minutos a 20kv-2µm -5000X; b) carvão do resíduo têxtil VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão) em temperatura de 500°C e tempo de retenção de 30 minutos a 20kv-2µm - 5000X.

Dessa forma, o carvão resultante da fibra A apresentou maior rendimento, o que tornou o carvão menos poroso e, portanto, mais estável para fins energéticos e menos promissor para fins de filtração, sobretudo quando comparado ao carvão VLA.

Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica - TGA é um processo de medida com variação contínua de massa de uma amostra em função da temperatura, utilizada para a determinação das temperaturas de degradação dos componentes do material.

De acordo com a TGA do resíduo têxtil A (Figura 4a), a primeira perda de massa de 5.185% ocorreu com pico de temperatura de 42.76°C, revelando que porosidade da fibra de algodão propiciou a remoção da umidade. A segunda perda de massa é de 86.72% com pico máximo em 405.49°C, levando assim mais tempo para perder menos massa.

A TGA do resíduo têxtil VLA (Figura 4b), apresenta dois estágios de degradação bem definidos, sendo que no primeiro estágio ocorreu a primeira perda de massa de 8.148% com pico de temperatura de 43.85°C correspondente a degradação da celulose. Já o segundo estágio resultou com pico máximo de temperatura de 386.92°C e perda de massa de 82.73%.

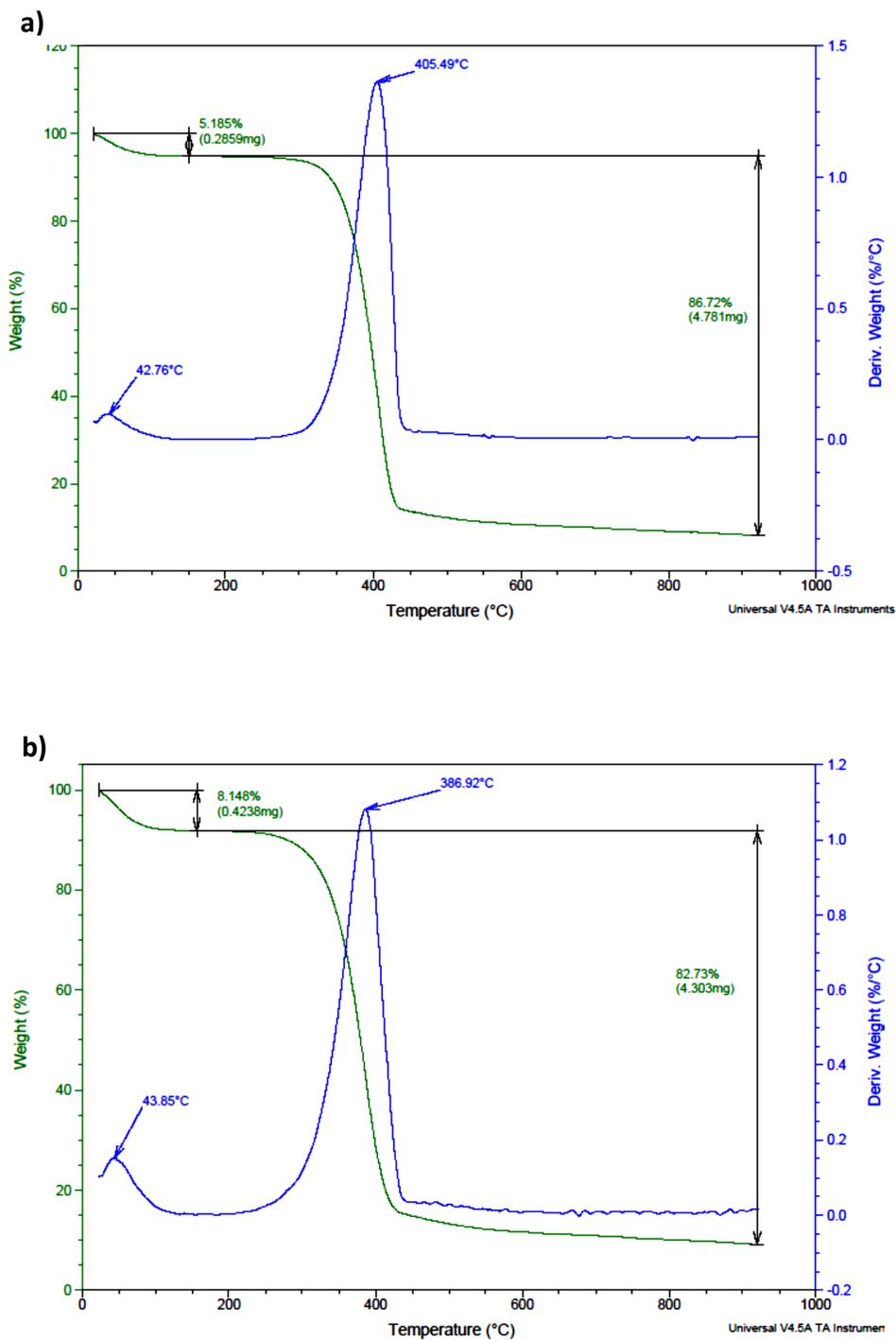


Figura 4. Espectro de FTIR dos resíduos têxteis: a) A (100% Algodão); b) VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão)

Análise de Temperatura

O processo de pirólise com os resíduos têxteis A e VLA foi executado em ambiente inerte, sem o uso de gás de arraste, sendo desenvolvido nas temperaturas de 500°C e 700°C, com tempos de retenção de 30 e 60 minutos respectivamente. O processo pirolítico iniciou-se de maneira endotérmica até a temperatura programada (*setpoint*) de 500°C e 700°C no forno indutor, mantendo-se estabilizada até o final do experimento. No entanto, a temperatura dentro do reator, continuou a subir por mais $\cong 250^\circ\text{C}$ após a temperatura *setpoint*, em um comportamento exotérmico, devido as características químicas do resíduo têxtil. O processo endotérmico foi de $\cong 7$ minutos para 500°C, e $\cong 7.5$ minutos para 700°C, e o tempo de permanência em estado exotérmico até a temperatura máxima do reator foi de $\cong 1.5$ minuto para temperaturas de 500°C e $\cong 3.5$ minutos para temperaturas de 700°C. O comportamento térmico dos resíduos têxteis foi investigado ao longo do processo e ficou evidente que o resíduo têxtil A (100% Algodão), na maior parte dos ensaios, atingiu maiores temperaturas em relação ao resíduo têxtil VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão) em tempos similares. O resultado está alinhado às características químicas dos resíduos celulósico, cujas regiões menos cristalinas confere ao mesmo, maior capacidade de combustão.

Rendimento Gravimétrico dos Subprodutos Gerados no Processo de Pirólise

No processo pirolítico de resíduos têxteis, os subprodutos gerados são formados pela fração líquida leve (Miranda *et al.*, 2007; Majanny *et al.*, 2010), fração líquida pesada (Zhu *et al.*, 2014; Poddar *et al.*, 2015), fração gasosa (Wu *et al.*, 2017) e fração sólida que são encaminhados ao tratamento de água e para fins energéticos (Nahil; Williams, 2012; Barişçi; Öncel, 2013; Balcik-Canbolat *et al.*, 2016; Chen, 2017; Rago; Surroop; Mohee, 2018; Yuan, 2018; Hanoğlu; Çay; Yandk, 2019). No entanto, a tecnologia empregada nesta pesquisa buscou acumular toda a fração líquida em um mesmo recipiente.

Os resultados revelaram que os resíduos têxteis compostos de A e VLA (Tabela 3), apresentaram maior fração líquida e menor fração sólida independente dos parâmetros pirolíticos em todos os experimentos, contudo, o tempo maior de permanência somada a temperatura mais alta elevou a fração gasosa e reduziu a fração de líquido e sólido. Este comportamento está associado a quantidade de carbono fixo e oxigênio presente nos resíduos, assim como sua maior densidade e menor teor de umidade.

Assim, ao analisar a influência dos parâmetros tempo e temperatura sobre a formação de cada subproduto, identificou-se que a temperatura foi o principal fator para formação de carvão e gás, agindo de forma inversamente proporcional a formação de carvão (independentemente do tipo de resíduo têxtil) e diretamente proporcional a formação de gás, sobretudo para o resíduo têxtil A (100% Algodão). Quanto a formação de líquido, o tempo e a temperatura se comportaram de maneira sincronizada.

Tabela 3. Rendimento das frações sólidas, líquidas e gasosas.

Ensaio	Parâmetros			Rendimentos						
	Massa (g)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Carvão (g)	Líquido (g)	Gás (g)	Carvão (%)	Líquido (%)	Gás (%)	
Resíduo A	I	10.17	60	500	2.55	4.75	2.87	25.10%	46.70%	28.20%
	II	9.90	60	700	2.02	4.43	3.45	20.47%	44.83%	34.70%
	III	9.90	30	500	2.47	4.81	2.62	24.97%	48.56%	26.47%
	IV	10.08	30	700	2.18	5.36	2.54	21.63%	53.20%	25.17%
Resíduo VLA	I	9.98	60	500	2.32	4.36	3.30	23.30%	43.60%	33.10%
	II	10.02	60	700	2.04	4.88	3.11	20.30%	48.70%	31.00%
	III	10.08	30	500	2.65	4.32	3.11	26.30%	42.87%	30.83%
	IV	9.92	30	700	1.98	5.00	2.94	19.97%	50.40%	29.63%

Segundo pesquisas realizadas por Czajczyńska *et al.* (2017); Paradela (2012); Nicolini (2013) e Chen (2017), altas temperaturas em longos períodos de detenção favorecem a formação da fração gasosa; baixas temperaturas e longos tempos de retenção favorecem a formação de sólido; e, tempo e temperaturas moderados favorecem a formação de líquido.

Dessa forma, tempo e a temperatura são inversamente proporcionais e correspondem aos resultados desta pesquisa.

Análise Elementar do Carvão dos Resíduos Têxteis

Os resultados obtidos na análise elementar dos resíduos sólidos gerados no processo de pirólise foram apresentados na Tabela 4. Ao comparar os resultados com a biomassa é possível notar que, o carvão reduziu o teor de oxigênio em ~74.32% e o teor de carbono foi elevado em ~51.83%. O teor de nitrogênio reduziu em ~83.02% e o de hidrogênio elevou-se em ~79.94% em experimentos com maior tempo de retenção, e em ~74.75% em experimentos com menor tempo de retenção.

É possível constatar que todos os elementos variaram conforme o tempo de retenção e a temperatura, particularmente os teores de carbono e hidrogênio, que demonstraram ser inversamente proporcionais ao tempo de retenção, enquanto o oxigênio apresentou comportamento inverso. Porém, a variação do teor de nitrogênio foi relacionada à temperatura, quando comparada ao tempo, apresentando maiores rendimentos em temperaturas menores para resíduos celulósicos e menores teores para os resíduos têxteis mistos.

Tabela 4. Análise elementar do carvão oriundos dos resíduos têxteis pirolisados.

Parâmetros	Temperatura (°C)	Tempo (min)	A (100% Algodão)				VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão)			
			C	H	N	O	C	H	N	O
Biomassa	-	-	42.59	5.05	-	52.36	38.77	6.14	0.09	55.00
I	500	60	81.53	1.24	0.49	16.74	82.40	0.61	0.35	16.64
II	500	30	82.76	2.59	0.83	13.82	86.81	0.11	-	13.08
III	700	60	82.34	1.13	0.54	15.99	87.83	1.51	0.45	10.21
IV	700	30	85.75	0.82	0.74	12.69	86.45	2.13	0.31	11.11

Assim, ao comparar as duas biomassas, foi possível verificar que o carvão do resíduo têxtil A apresentou menor teor de carbono; maior teor de oxigênio; maior teor de nitrogênio e hidrogênio quando comparado ao carvão do resíduo VLA. Resultados semelhantes foram observados no estudo de Williams e Reed (2004), no qual foi produzido carvão ativado a partir de fibras naturais de linho, cânhamo em temperaturas próximas a este estudo.

Foi observado ainda que, os teores de carbono e hidrogênio foram inversamente proporcionais ao teor de oxigênio (Williams; Reed, 2004). No entanto, nos estudos de Nahil e Williams (2010) e Hanoğlu; Çay e Yandk (2019) foi possível notar, que a temperatura exerceu maior influência quando comparada ao tempo, sendo ela, diretamente proporcional a formação do teor de carbono.

Dessa forma, o alto teor de carbono confere ao carvão do material têxtil, alta resistência de degradação térmica e maior resistência no interior de fornos destinados a produção de calor ou energia, bem como, a biomassa com alto teor de material volátil representa ótimos combustíveis para o processo de pirólise.

Conclusão

As características físico químicas dos resíduos têxteis A (100% Algodão) e VLA (65% Viscose, 21% Linho, 14% Algodão) revelaram características favoráveis não só a produção de energia, mas também para a utilização em outros setores industriais.

O alto poder calorífico foi atribuído a presença da lignina e a áreas amorfas, associada ao alto teor de material volátil, baixo teor de umidade e cinzas, baixa densidade e alto teor de C e H encontrados nos resíduos têxteis A (47.64%) e VLA (44.91%). O material têxtil sólido foi comparado ao carvão betuminoso nos teores de C, N e H e teor de TOC.

Sendo assim, conclui-se que os resíduos têxteis A e VLA apresentaram potencial de reciclabilidade nas indústrias alimentícia, farmacêutica, química e energética.

Referências bibliográficas

- ABIT, Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (2020). Acesso em 13 jan. 2021, disponível em: www.abit.org.br/uploads/arquivos/S%C3%ADntese%20COMEX%20-%20Dezembro.pdf
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2018/2019). Acesso em: 12 jan. 2021. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/panorama>
- Amaral, M. C. do. (2016) *Reaproveitamento e Reciclagem Têxtil no Brasil: ações e prospecto de triagem de resíduos para pequenos geradores*. Dissertação (Mestrado), Curso de Têxtil e Moda, Escola de Artes Ciência e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 123 pp.
- Barişçi, S., Öncel, M. S. (2013) *The Disposal of Combed Cotton Wastes by Pyrolysis*. *International Journal Of Green Energy*, [s.l.], **11**(3), 255-266, <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.772516>.
- Canbolat, C. B., Ozbey, B., Dizge, N., Keskinler, B. (2016) Pyrolysis of commingled waste textile fibers in a batch reactor: Analysis of the pyrolysis gasses and solid product. *International Journal of Green Energy*. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1255634>
- Chen, J. Y. (2017) *Introduction. Activated Carbon Fiber And Textiles*, [s.l.], 3-20, <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100660-3.00001-8>
- Czajczyńska, D., Nannou, T., Anguilano, L., Krzyzyska, R., Ghazal, H., Spencer, N., Jouhara, H. (2017) Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science And Engineering Progress*, [s.l.], **3**, 171-197, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>
- Ellen Macarthur Foundation. (2017) *Circular Economy System Diagram*. (2017). Acesso em 20 jan. 2021, disponível em: www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactive-diagram
- FIESP, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (2019). Acesso em 13 jan. 2021, disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/dino/fiesp-apresenta-projecao-de-13-de-crescimento-acumulado-ate-2021-para-o-mercado-de-moda-no-brasil,28707f5deec5f9f1142dad511e619530xqrdjj6u.html>
- Figueiredo, A. L. (2011) *Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo*, Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 127 pp.
- Fischer, S. O. (2015) *Avaliação do potencial de uso de lodo têxtil como biomassa combustível para geração de energia*, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade da Região de Joinville, Joinville, 69 pp.
- Hanoğlu, A., Çay, A., Yandk, J. (2019) Production of biochars from textile fibres through torrefaction and their characterisation. *Energy*, [s.l.], **166**, 664-673, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.123>
- IEMI, Instituto de Estudos e Marketing Industrial (2020). *A liquidez e o consumo pós pandemia*. Acesso em: 09 jan. 2021, disponível em: www.iemi.com.br/a-liquidez-e-o-consumo-pos-pandemia
- Miranda, R., Sosa Blanco, C., Bustos-Martinez, D., Vasile, C. (2007) Pyrolysis of textile wastes. *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, [s.l.], **80**(2), 489-495, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.03.008>
- Majanny, A., Nassour, A., Gose, S., Scholz, R., Nelles, M. (2010) Characterization and thermal behaviour of textile waste from the industrial city of Aleppo in Syria. *Waste Management & Research*, [s.l.], **29**(3), 277-283, <https://doi.org/10.1177/0734242x10365736>
- Nahil, M. A., Williams, P. T. (2012) Pore characteristics of activated carbons from the phosphoric acid chemical activation of cotton stalks. *Biomass And Bioenergy*, [s.l.], **37**, 142-149, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.019>
- Nicolini, K. P. (2013) *Pirólise de biomassa em baixas temperaturas*, 1ª ed., Campinas, 94 pp.
- Paradela, F. M. R. (2012) *Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa*. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 290 pp.

- Poddar, S., Biswas, R., De, S., Chowdhary, R. (2015) Analysis of Tar by Catalytic Pyrolysis of Waste Jute. *Journal Of Advances In Mechanical Engineering And Science*, [s.l.], **1**(1), 12-19, <https://doi.org/10.18831/james.in/2015011002>
- Plens, A. C. de O. (2018) *Produção limpa: síntese de fibras de viscose ativadas para remoção de fármacos presentes em água*, Tese (Doutorado) Curso de Engenharia de Produção, Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'oeste, 121 pp.
- Rago, Y. P., Surroop, D., Mohee, R. (2018) Torrefaction of textile waste for production of energy-dense biochar using mass loss as a synthetic indicator. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, [s.l.], **6**(1), 811-822, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.055>
- Sousa, C. M. T. de. (2009) *Valorização energética dos resíduos industriais têxteis e poliméricos*. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 109 pp.
- Teixeira, J. A. (2019) *Análise prática da pirólise de resíduos têxteis compostos de viscose e poliéster para obtenção de carvão e bio-óleo em reator de leito fixo sem fluxo de gás*, Tese (Doutorado), Curso de Tecnologia Ambiental. Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 211 pp.
- Zonatti, W. F. (2016) *Geração de resíduos sólidos da indústria brasileira têxtil e de confecção: materiais e processo para reuso e reciclagem*, Tese (Doutorado em Ciências), Programa de Pós Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Universidade de São Paulo, São Paulo, 251 pp.
- Zhu, F., Feng, Q., Xu, Y., Liu, R., Li, K. (2014) Kinetics of pyrolysis of ramie fabric wastes from thermogravimetric data. *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, [s.l.], **119**(1), 651-657, <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4179-3>
- Wu, Ye *et al.* (2017) *Catalytic pyrolysis and gasification of waste textile under carbon dioxide atmosphere with composite Zn-Fe catalyst*. *Fuel Processing Technology*, [s.l.], **166**, 115-123, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.05.025>
- Yuan, Z., Xu, Z., Zhang, D., Chen, W., Zhang, T., Huang, Y., Gu, L., Deng, H., Tian, D. (2018) Box-Behnken design approach towards optimization of activated carbon synthesized by co-pyrolysis of waste polyester textiles and MgCl₂. *Applied Surface Science*, [s.l.], **427**, 340-348, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.241>